

УДК 532.525.2

## **Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру круглой струи\***

**Г.В. Козлов, Г.Р. Грек, А.М. Сорокин, Ю.А. Литвиненко**

*Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

Представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию начальных условий на срезе сопла на структуру круглой струи и характеристики ее развития. Показаны особенности развития ламинарной и турбулентной круглых струй, реализованные при одном и том же числе Рейнольдса. Обсуждаются картины дымовой визуализации струи при изменении начальных условий ее формирования (распределений средней и пульсационной составляющих скорости на срезе сопла) с помощью удлинения канала соплового аппарата. Показана возможность увеличивать область чисто ламинарного течения в струе и затягивать процесс ее турбулизации по пространству за счет параболизации профиля скорости на срезе сопла при его удлинении. Выявлены особенности развития вихревых структур струи при акустическом воздействии на нее. Показано, что для создания турбулентной круглой струи непосредственно на выходе из сопла необходимо достаточно большое его удлинение, обеспечивающее пространственное нарастание толщины турбулентного пограничного слоя вплоть до образования полностью турбулентного профиля скорости в поперечном сечении канала.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Исследованию струйных и свободных сдвиговых течений посвящено большое количество как теоретических [1–4], так и экспериментальных работ [5–9]. Важность таких исследований очевидна как с точки зрения понимания физической природы развития струй, так и их практического использования в различных технических приложениях. Например, струи создают реактивную тягу ракет и самолетов и управляют полетом этих аппаратов, используются для работы турбин, применяются для смешения газов и жидкостей и т. д.

Для организации струйного течения служит так называемый сопловой аппарат, представляющий собой в случае реактивного сопла специально спрофилированный насадок, устанавливаемый для преобразования потенциальной энергии протекающего рабочего тела (жидкость, пар или газ) в кинетическую энергию. После прохождения реактивного сопла повышается скорость движения рабочего тела. Впервые такое сопло было применено К.Г.П. Лавалем в 1889 г. для повышения скорости истечения пара перед рабочим колесом паровой турбины. Струя, по характеру истечения, может быть ламинарной и турбулентной, дозвуковой и сверхзвуковой. Суживающееся реактивное сопло используют для создания дозвуковых скоростей истечения, а сопла с расширяющейся выходной частью (сопло Лавала) — для получения сверхзвуковых скоростей. Если скорость истечения

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (грант № МК – 1807.2007.1), Министерства образования и науки РФ (грант № РНП. 2.1.2.3370) и РФФИ (грант № 05-01-00034).

не превосходит скорости, с которой в вытекающих газах распространяются звуковые волны, то сопло представляет собой простой цилиндрический или суживающий отрезок трубы.

Пример практического использования дозвукового реактивного сопла, представляющего собой простую трубу длиной примерно 1,5 м, — это конструкция пульсирующего воздушно-реактивного двигателя (ПуВРД) самолета-снаряда ФАУ-1. Двигатель представлял собой стальную трубу, открытую с задней части и закрытую спереди пластинчатыми пружинными клапанами, открывавшимися под давлением встречного потока воздуха. Когда воздух, открыв клапаны решетки, входил в трубу, здесь создавалось повышенное давление; одновременно сюда впрыскивалось топливо; происходила вспышка, в результате которой расширившиеся газы действовали на клапаны, закрывая их, и создавали импульс тяги. После того как продукты сгорания выбрасывались через реактивное сопло, в камере сгорания создавалось пониженное давление и воздух снова открывал клапаны; начинался новый цикл работы двигателя. Максимальная скорость ФАУ-1 не превышала 580 км/час.

В настоящее время для формирования, например, круглой дозвуковой струи часто используют осесимметричное сопло Витошинского [10]. Для разбиения крупных вихревых структур, поступающих с лопаток источника потока, на более мелкие и выравнивания потока перед входом непосредственно в сопловой аппарат в форкамере струйной установки устанавливают хонейкомб и набор детурбулизирующих сеток. При этом на срезе сопла формируется струя с ламинарным характером течения в определенном диапазоне чисел Рейнольдса. Неустойчивость такой струи обычно связывают с возникновением вихревых колец — так называемых вихрей Кельвина–Гельмгольца. Начальные условия на срезе сопла, т. е. распределения средней и пульсационной составляющих скорости потока, создают условия формирования структуры струи, ее неустойчивости и дальнейшей турбулизации вниз по потоку. Первичная неустойчивость ламинарной круглой струи, связанная с возникновением двумерных кольцевых вихрей Кельвина–Гельмгольца, изучалась многими исследователями. Среди последних работ следует отметить обзор [11], в котором анализируются результаты изучения собственных колебаний вихревого кольца, возникновения в нем турбулентности и генерации звука в идеальной несжимаемой жидкости. В работе [4] впервые показано, что сдвиговый слой осесимметричной струи содержит упорядоченные вихревые структуры. Измерения, выполненные в [12], показали, что вихревые структуры взаимодействуют и объединяются. Позднее была предложена модель “вихревой дорожки”, описывающая эволюцию азимутальных вихревых колец [13]. При измерении круглой струи вблизи сопла авторы работы [7] показали, что вначале возникает первичная неустойчивость Кельвина–Гельмгольца, ведущая к последовательному сворачиванию слоев сдвига в вихревые структуры, представляющие собой череду вихревых колец. Вторичные неустойчивости формируют продольные вихревые структуры, взаимодействующие с первичными вихревыми кольцами. Продольные структуры формируются в областях между соседними вихревыми кольцами и оказывают существенное влияние на процессы смешения и динамику течения. В работах [14, 15] показано, что продольные структуры играют важную роль в механизме турбулизации струй через процесс их взаимодействия с кольцевыми вихрями, приводя к трехмерному искажению последних и появлению азимутальных выбросов в виде  $\Lambda$  или  $\Omega$ -образных вихрей, вторичное разрушение которых приводит к турбулизации струи.

Исследования турбулентных струй [16] показали существование когерентных структур. В [16] выполнены детальные измерения когерентных колец и выявлен

механизм азимутального вихревого взаимодействия. Экспериментальные и численные исследования [17] показали, что между вихревыми кольцами присутствуют продольные структуры, при этом они играют важную роль в переходе к трехмерной турбулентности. В работе [18] показано, что наиболее важным процессом в развитии когерентных структур в турбулентной струе является вулканоподобный “взрыв”, обусловленный прохождением азимутальной когерентной структуры или кольца вблизи потенциального ядра струи. Кольцевые вихри инжектируют высокоскоростную жидкость. Внедрение этой жидкости между соседними кольцами создает высокие напряжения сдвига, играющие важную роль в эволюции продольных вихревых пар, вращающихся в противоположных направлениях. Таким образом, механизм развития и турбулентного разрушения круглой ламинарной струи, сформированной в классическом дозвуковом сопле (с определенными гидродинамическими начальными условиями на срезе сопла), достаточно детально исследован. Возникает естественный вопрос: а если изменить начальные условия формирования струи, например, создав параболический профиль средней скорости на срезе сопла в отличие от перегибного профиля в случае классического сопла, что произойдет с механизмом развития ламинарной и турбулентной струи? Какие виды неустойчивостей будут играть роль в механизме турбулизации струи и какой будет структура ламинарной и турбулентной струи?

Таким образом, цель настоящей работы состояла в попытке дать определенные ответы на эти вопросы. Для чего была создана новая струйная установка, позволяющая менять начальные условия формирования круглой струи изменением длины канала соплового аппарата. При этом структура и характеристики развития течения в струе фиксировались с помощью дымовой визуализации течения и измерялись термоанемометром.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Схема и фотография струйной установки, позволяющей менять начальные условия (распределения средней и пульсационной составляющих скорости) на срезе сопла, показаны на рис. 1 и 2. Основой установки является классический сопловой аппарат, выполненный по схеме сопла Витошинского 1 с хонейкомбом 2 и набором детурбулизирующих сеток 3 в форкамере 4 (см. рис. 1). К выходу классического сопла 1 стыковались трубки 5 различной длины (430, 870, 1300 и 4000 мм) и внутренним диаметром, равным диаметру выходного отверстия классического сопла ( $d = 20$  мм). Данная конфигурация установки позволяла изменять начальные условия струи на срезе сопла, постепенно формируя параболический

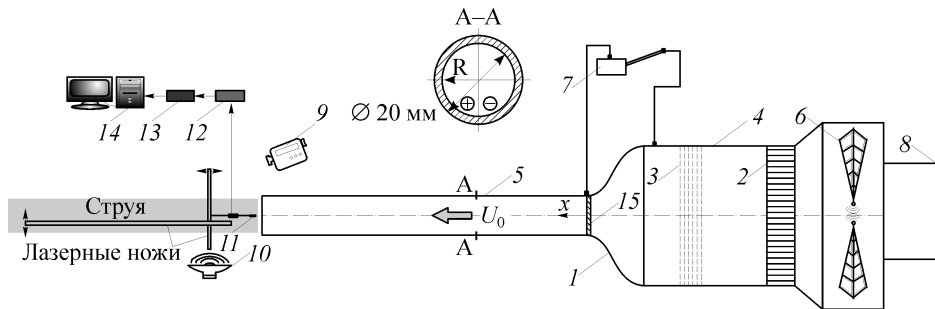


Рис. 1. Струйная установка: сопло Витошинского 1, хонейкомб 2, набор детурбулизирующих сеток 3, форкамера 4, набор удлинительных трубок 5 (430, 870, 1300 и 4000 мм), вентилятор 6, жидкостный наклонный микроанометр 7, генератор дыма 8, видеокамера 9, динамический громкоговоритель 10, датчик термоанемометра 11, термоанемометр 12, АЦП 13, компьютер 14, турбулизатор 15.

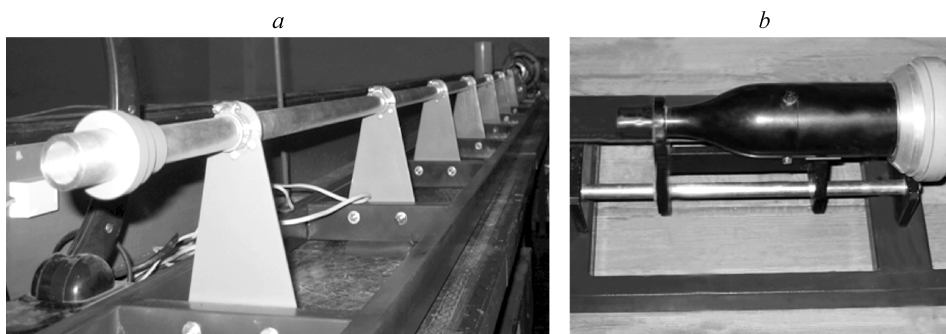


Рис. 2. Общий вид струйной установки с каналом длиной 4000 мм (а) и участок с классическим (коротким) соплом (б).

профиль скорости течения в канале и на выходе из него, пока он не становился полностью профилем скорости, типичным для течения Хагена–Пуазейля для круглой трубы при достаточно большой длине канала.

Поток воздуха в канале струйной установки создавался с помощью вентилятора 6, скорость на выходе из сопла 1 измерялась жидкостным наклонным микроманометром 7 и составляла в данном эксперименте  $U_0 = 5$  м/с ( $Re = U_0 \times d/\nu = 6667$ ). Проводилось два вида исследований: дымовая визуализация и термоанемометрические измерения течения в струе. Дымовая визуализация осуществлена с помощью подачи в струйную установку со стороны вентилятора дыма, генерируемого дымогенератором 8 промышленного производства (см. рис. 1). Развитие визуализированной дымом струи и ее структура снимались на видеокамеру 9 как в общем виде, так и в ее продольном и поперечном сечениях с помощью подсветки сечений узким лазерным ножом в различных координатах вдоль и поперек струи (см. рис. 1). Данная методика детально описана в работе [15], где она использована при исследовании процесса развития классической ламинарной струи и механизма ее турбулизации. В той же работе, как и в настоящей, исследовалось воздействие акустики, генерируемой динамическим громкоговорителем 10, на структуру струи. С ее помощью также синхронизовался сход вихрей Кельвина–Гельмгольца с моментами включения инфракрасного лазера на короткий промежуток времени для стробоскопирования динамики взаимодействия кольцевых вихрей с полосчатыми структурами и возможности записать этот процесс на видеокамеру.

Термоанемометрические измерения в струе проведены с помощью термоанемометра постоянного сопротивления фирмы DISA. Термоанемометр измерял среднюю по времени продольную компоненту скорости  $U$  и пульсации скорости  $u'$ . Датчик 11 с проволочкой из золоченого вольфрама длиной 1 мм и диаметром 5  $\mu$ м с коэффициентом перегрева 1,8 калибровался в свободном потоке с использованием модифицированного закона Кинга:  $U = k_1(E^2 - E_0^2)^{1/n} + k_2(E - E_0)^{1/2}$ , где  $E$  и  $E_0$  — выходные напряжения термоанемометра при скорости потока и ее отсутствии соответственно;  $k_1$ ,  $k_2$  и  $n$  — константы. Показатель экспоненты ( $n$ ) обычно близок к 0,5, вторая константа ( $k_2$ ) учитывает свободную конвекцию на стенке при малых скоростях потока. Максимальная ошибка при калибровке датчика не превышала 1 % от  $U_\infty$ . Сигнал с датчика 11 поступал в термоанемометр 12, затем подавался на аналого-цифровой преобразователь АЦП 13 и далее в компьютер 14, где данные измерений накапливались в памяти компьютера, затем подвергались программной обработке и ее результаты представлялись в виде графиков. Перемещение датчика осуществлялось поперек струи с шагом 0,5 мм и вдоль нее в точках с координатами  $x = 2, 10, 20$  мм от среза сопла. Исследовалось развитие как ламинарной, так и

турбулентной струи, причем турбулентная струя создавалась с использованием турбулизатора 15 (см. рис. 1), представляющего собой 5 мм ширины наждачную бумагу (средняя величина зерна шероховатости составляла 300  $\mu\text{м}$ ), наклеенную на внутреннюю поверхность выхода классического сопла. За счет турбулизатора ламинарное и турбулентное течение в струе было реализовано при одной и той же скорости потока.

Графики построены в поперечном сечении струи. Ось абсцисс нормирована на радиус канала как  $r/R$ , где  $R$  — радиус круглого канала, а  $r$  — текущая координата. Ось ординат нормирована на среднерасходную скорость в струе  $U_{\text{ср}}$  для распределений средней скорости  $U$  поперек струи, а также на скорость струи на оси канала  $U_0$  для среднеквадратичных пульсаций скорости  $u'$  в процентах от  $U_0$ . Текущая координата измерений от среза сопла вниз по потоку —  $x$ . Другие условные обозначения по тексту статьи:  $L/d$  — удлинение канала как отношение длины канала —  $L$  к его внутреннему диаметру —  $d$ ,  $l/d$  — величина калибра чисто ламинарной струи как отношение длины чисто ламинарной струи —  $l$  к внутреннему диаметру выходного сопла канала —  $d$ .

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ

### 2.1. Ламинарная струя

Исследования развития и механизма турбулеизации классической ламинарной круглой струи проведены ранее в работах [14, 15]. Исследования на новой струйной установке подтвердили результаты предыдущих. Однако настоящая установка позволила нам провести наблюдения за развитием ламинарной круглой струи в зависимости от изменения начальных условий ее формирования удлинением выходного участка сопла, начиная от классического (короткого) сопла вплоть до ее истечения из длинного канала, в котором формируется каноническое течение с параболическим профилем скорости Хагена–Пуазейля. Более детально все этапы описаны ниже.

#### 2.1.1. Классическая круглая струя

На рис. 3 представлены распределения средней  $U$  и пульсационной  $u'$  составляющих скорости поперек классической ламинарной круглой струи на различных расстояниях от среза сопла (см. рис. 3, *a*, *b*). На графике (см. рис. 3, *a*) видно, что распределение скорости поперек классической струи представляет собой П-образный профиль с небольшой вогнутостью в области ядра струи. По-видимому, такой характер распределения вызван непрерывным сходом из сопла кольцевых вихрей в классической круглой струе, т. е. неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца. При этом максимальный уровень пульсаций порядка 1 %  $U_0$  наблюдается в области сдвигового слоя струи (см. рис. 3, *b*) вблизи сопла и растет до 4,5 %  $U_0$  вниз по потоку. В области ядра струи величина пульсаций скорости значительно ниже и изменяется от 0,4 %  $U_0$  вблизи сопла до 1 %  $U_0$  вниз по потоку. Такой характер распределений скорости и ее пульсаций для классической круглой струи совпадает с данными предыдущих исследований [14, 15]. По результатам дымовой визуализации течения в классической струе можно четко наблюдать кольцевые вихри на общем виде (см. рис. 3, *c*) и процесс взаимодействия кольцевых вихрей с полосчатыми структурами, приводящий к образованию азимутальных структур в поперечном сечении струи (см. рис. 3, *d*). Таким образом, турбулизация ламинарной классической круглой струи связана с неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца, возникающей непосредственно на выходе струи из сопла,

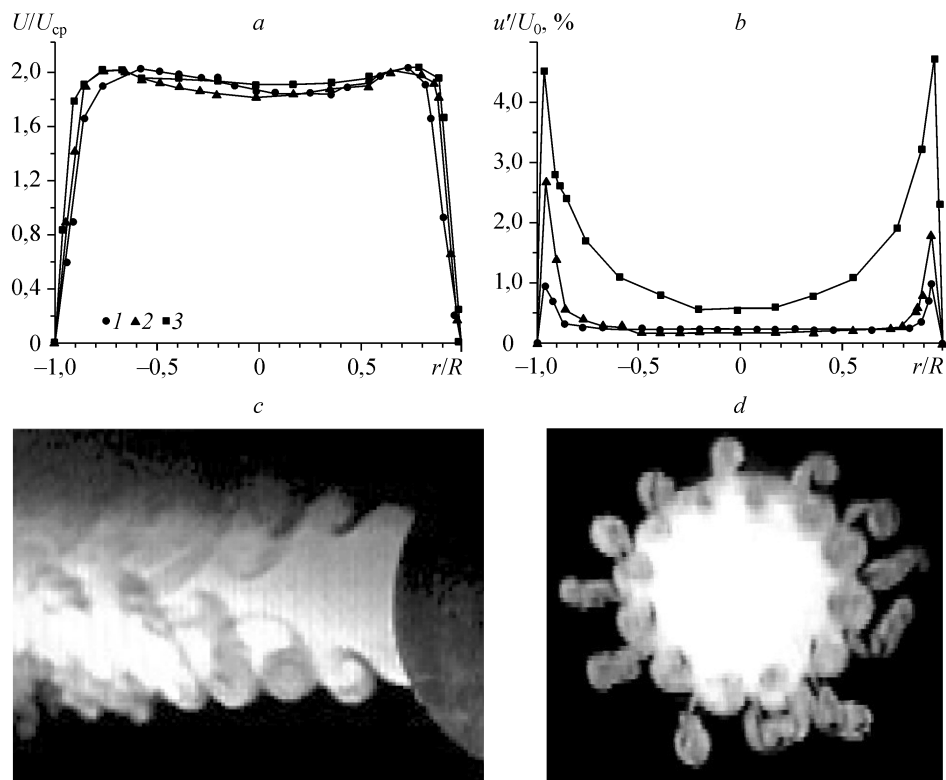


Рис. 3. Распределения скорости (a) и ее пульсаций (b) в поперечном сечении классической круглой струи на различных расстояниях от среза канала вниз по потоку (1, 2, 3 при  $x = 2, 10, 20$  мм соответственно), картины дымовой визуализации струи вдоль (c) и поперек (d) потока, скорость потока на оси струи  $U_0 = 5$  м/с ( $Re = U_0 \times d/\nu = 6667$ ).

дальнейшим процессом взаимодействия кольцевых вихрей с полосчатыми структурами, образованием азимутальных вихревых структур, которые интенсифицируют процесс смешения струи с окружающим газом, и полной турбулизацией струи. Настоящее исследование подтвердило как хорошо известные теоретические и экспериментальные данные развития классической круглой струи многих исследователей, так и новые данные, полученные нами ранее в экспериментах [14, 15].

### 2.1.2. Круглая струя на выходе из канала длиной 430 мм

Рассмотрим, что произойдет со струей, если удлинить канал ее формирования, добавив к классическому соплу трубку длиной 430 мм одного внутреннего диаметра с диаметром выходного отверстия классического сопла (рис. 4). Заметим, что, удлинняя сопловой аппарат, мы изменяем начальные условия формирования круглой струи. Если в предыдущем случае мы имели профиль распределения скорости в поперечном сечении струи П-образного вида, то в данной ситуации (рис. 4, a) можно наблюдать его искажение в сторону приближения к параболической форме, хотя в ядре струи еще сохраняется характерная полочка. Распределение пульсаций скорости  $u'$  в поперечном сечении струи для различных расстояний вниз по потоку показано на рис. 4, b. Видно, что максимальный уровень пульсаций скорости наблюдается в области сдвигового слоя струи и составляет порядка  $0,7\% U_0$  вблизи сопла и растет до  $2,5\% U_0$  вниз по потоку. В области ядра струи величина пульсаций скорости значительно ниже и составляет примерно  $0,3\text{--}0,4\% U_0$ .

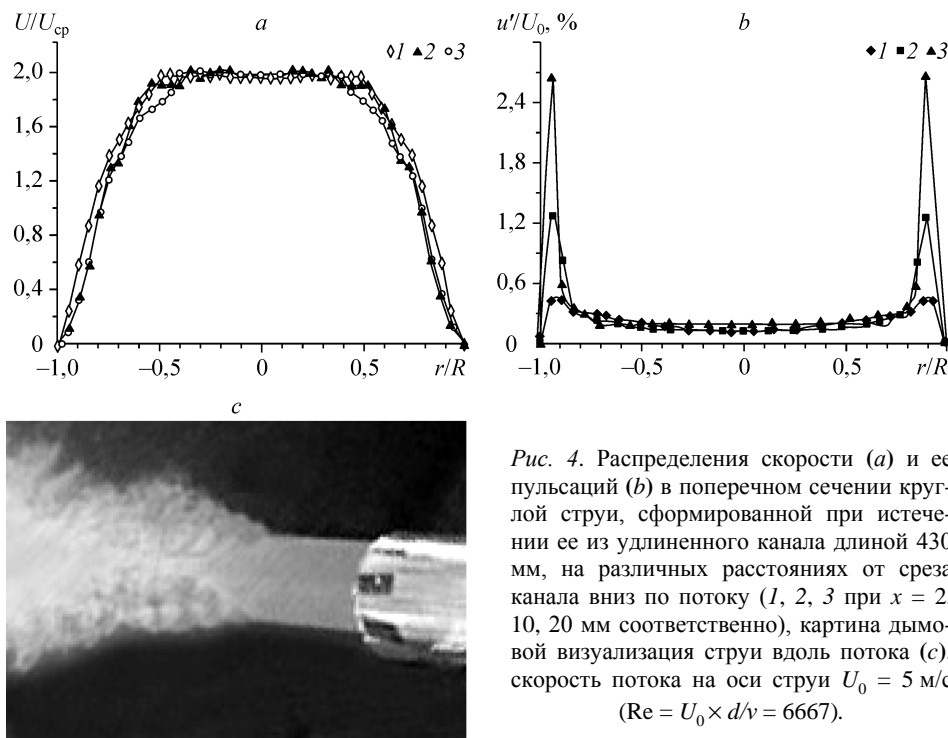


Рис. 4. Распределения скорости (a) и ее пульсаций (b) в поперечном сечении круглой струи, сформированной при истечении ее из удлиненного канала длиной 430 мм, на различных расстояниях от среза канала вниз по потоку (1, 2, 3 при  $x = 2, 10, 20$  мм соответственно), картина дымовой визуализации струи вдоль потока (c), скорость потока на оси струи  $U_0 = 5$  м/с ( $Re = U_0 \times d/\nu = 6667$ ).

во всем диапазоне измерений вниз по потоку. В целом, по сравнению с предыдущим случаем, уровень пульсаций скорости заметно снизился. Качественно изменилась и сама струя, что можно наблюдать на картине визуализации общего вида струи (рис. 4, c). Видно, что появилась область чисто ламинарной струи без каких-либо структур протяженностью порядка двух калибров ( $l/d = 2$ ). Далее вниз по потоку, можно наблюдать, вероятно, появление кольцевых вихрей и, наконец, полной турбулизации струи. Таким образом, изменение начальных условий формирования струи привело к изменению и самого характера течения струи. Обнаружилась чисто ламинарная область течения, а переходная область переместилась далее вниз по потоку.

### 2.1.3. Круглая струя на выходе из канала длиной 870 мм

Теперь рассмотрим, что произойдет со струей, если еще больше удлинить канал ее формирования, добавив к классическому соплу трубку длиной 870 мм одного внутреннего диаметра с диаметром выходного отверстия классического сопла (рис. 5). В предыдущем случае имелся профиль распределения скорости в поперечном сечении струи с характерным участком ее параболического искажения, в данной ситуации (рис. 5, a) можно наблюдать еще большее его искажение в сторону приближения к параболической форме, хотя в ядре струи все еще сохраняется характерная полочка. Распределение пульсаций скорости  $u'$  в поперечном сечении струи для различных расстояний вниз по потоку показано на рис. 5, b. Видно, что максимальный уровень пульсаций скорости наблюдается в области сдвигового слоя струи и составляет порядка 0,2 %  $U_0$  вблизи сопла, с возрастанием до 1,5 %  $U_0$  вниз по потоку. В области ядра струи величина пульсаций скорости значительно ниже и составляет примерно 0,4 %  $U_0$  во всем диапазоне измерений вниз по потоку. В целом, по сравнению с предыдущими случаями, уровень пульсаций скорости заметно снижается при удлинении канала истечения, хотя в каждом случае наблю-

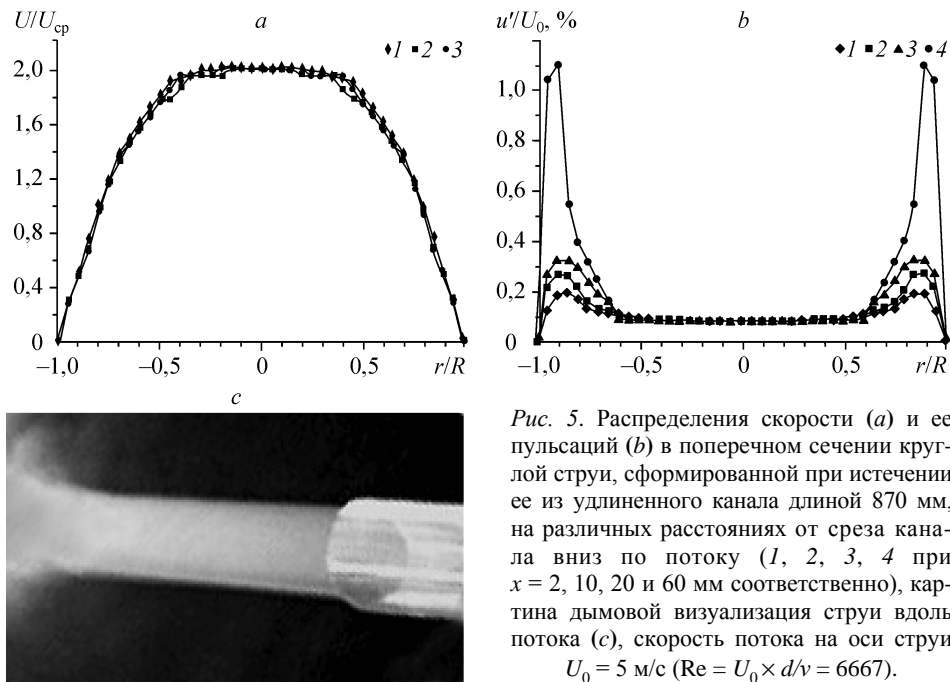


Рис. 5. Распределения скорости (a) и ее пульсаций (b) в поперечном сечении круглой струи, сформированной при истечении ее из удлиненного канала длиной 870 мм, на различных расстояниях от среза канала вниз по потоку (1, 2, 3, 4 при  $x = 2, 10, 20$  и  $60$  мм соответственно), картина дымовой визуализации струи вдоль потока (c), скорость потока на оси струи  $U_0 = 5$  м/с ( $Re = U_0 \times d/\nu = 6667$ ).

дается рост уровня пульсаций вниз по потоку. Качественно еще более изменилась и сама струя, что можно наблюдать на картине визуализации струи общего вида (рис. 5, c). Видно, что протяженность области гладкой ламинарной струи без каких-либо структур увеличилась до четырех калибров ( $l/d = 4$ ). Далее вниз по потоку можно наблюдать процесс турбулизации струи. Таким образом, еще большее изменение начальных условий формирования струи привело к еще большему, чем в предыдущем случае, изменению и самого характера течения струи. Ламинарная область течения стала еще более протяженной, а переходная область переместилась далее вниз по потоку.

#### 2.1.4. Круглая струя на выходе из канала длиной 4000 мм

Сейчас рассмотрим, что произойдет со струей, если удлинить канал ее формирования, добавив к классическому соплу трубку длиной 4000 мм одного внутреннего диаметра с диаметром выходного отверстия классического сопла (рис. 6). В предыдущих случаях исследований струи имелся профиль распределения скорости в поперечном сечении струи с постепенным его приближением к параболическому профилю, в данной ситуации (рис. 6, a) можно наблюдать полностью параболический профиль скорости или профиль Хагена–Пуазейля, характерный для канонического течения в длинной круглой трубе. Распределение пульсаций скорости  $u'$  в поперечном сечении струи для различных расстояний вниз по потоку показано на рис. 6, b. Видно, что максимальный уровень пульсаций скорости наблюдается в области сдвигового слоя струи и составляет порядка 0,25 %  $U_0$  вблизи сопла и возрастает до 1,2 %  $U_0$  вниз по потоку. В области ядра струи величина пульсаций скорости значительно ниже и составляет примерно 0,4 %  $U_0$  во всем диапазоне измерений вниз по потоку. В целом, по сравнению с предыдущим случаем, уровень пульсаций скорости примерно остался на том же уровне, хотя тенденция его возрастания вниз по потоку в области слоя сдвига остается прежней. Качественное изменение структуры струи можно наблюдать на картине ее



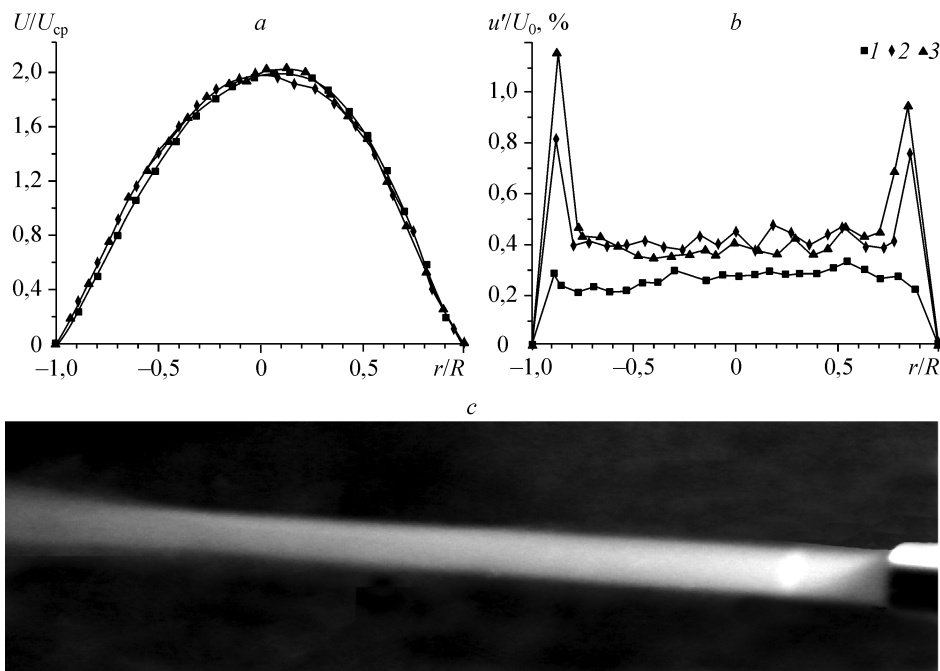


Рис. 6. Распределения скорости (а) и ее пульсаций (b) в поперечном сечении круглой струи, сформированной при истечении ее из удлиненного канала длиной 4000 мм, на различных расстояниях вниз по потоку от среза канала (1, 2, 3 при  $x = 2, 10, 20$  мм соответственно), картина дымовой визуализации струи вдоль потока (с), скорость потока на оси струи  $U_0 = 5$  м/с ( $Re = U_0 \times d/\nu = 6667$ ).

дымовой визуализации (рис. 6, с). Видно, что протяженность области чистой ламинарной струи без каких-либо структур увеличилась до десяти калибров ( $l/d = 10$ ). В пределы разрешения фотографии даже не вошел процесс дальнейшей турбулизации струи вниз по потоку. Таким образом, изменение начальных условий формирования струи, связанное с ее истечением из канала с характерным каноническим профилем скорости Хагена–Пуазейля, привело к кардинальному изменению и самого характера течения струи. Ламинарная область течения стала преобладающей, а переходная область переместилась далеко вниз по потоку.

### 2.1.5. Акустическое воздействие на круглую струю

В работе [15] показано, что гармоническое акустическое воздействие на круглую струю с определенной амплитудой и частотой приводило к интенсификации процесса развития полосчатых структур и их взаимодействию с кольцевыми вихрями вблизи классического сопла. Далее вниз по потоку процесс турбулизации струи при акустическом воздействии на нее ускорялся по пространству, что указывало на активизацию акустикой механизма смешения. В настоящих исследованиях установлено, что акустическим воздействием на струю можно изменять масштаб кольцевых вихрей. Например, при удлинении канала до 430 мм ( $L/d = 21,5$ ) вихревые структуры струи возникают значительно ниже по потоку и при акустическом воздействии на нее с частотой 110 и 250 Гц (рис. 7) масштаб кольцевых структур уменьшился более чем в два раза в последнем случае. В ситуации классической ламинарной круглой струи кольцевые вихри генерируются непосредственно на выходе из сопла и воздействие акустики на их масштабы качественно совпадает с приведенным здесь случаем. При удлинении канала до 4000 мм ( $L/d = 200$ ) результатов акустического воздействия на чисто ламинарную круглую

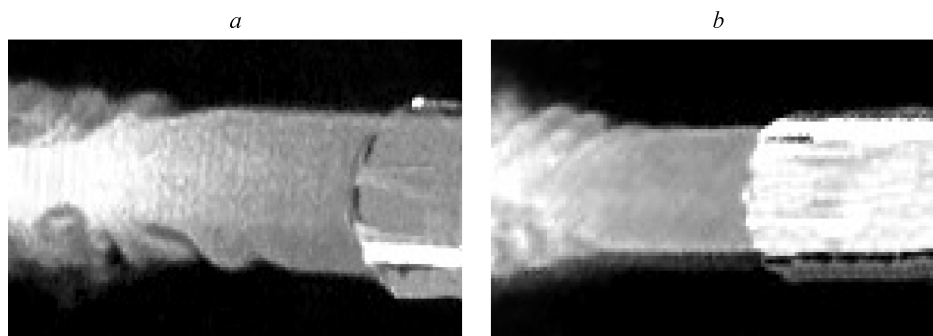


Рис. 7. Визуализация круглой струи, сформированной в канале с удлинением  $L/d = 21,5$ , при акустическом воздействии на нее частотой  $F = 110$  (a) и  $250$  (b) Гц,  $U_0 = 5$  м/с ( $Re = U_0 \times d/\nu = 6667$ ).

струю не обнаружено, причем частота и амплитуда сигнала изменялись в широком диапазоне (частота от единиц Гц до десятков кГц, а интенсивность звукового воздействия доходила до 100 децибел). Такой результат требует дополнительного изучения.

В естественных условиях развития очень протяженной чисто ламинарной струи наблюдалось появление вихревых структур, причина возникновения которых требует определенного осмысления. Примеры наблюдений таких структур при дымовой визуализации струи и мгновенной фотосъемке ее поперечных сечений в различных позициях вниз по потоку представлены на рис. 8. Проведем анализ и сравнение наблюдаемого явления с уже известными типами неустойчивости осесимметричных струй.

Известно [19], что на начальном участке развития круглой струи, где тонкий сдвиговый слой с большим градиентом скорости, доминирует неустойчивость Кельвина–Гельмгольца (осесимметричная мода неустойчивости), но далее вниз по потоку с ростом толщины слоя сдвига начинают доминировать азимутальные (спиралевидные) моды неустойчивости разных порядков. Характерными структурами неустойчивости Кельвина–Гельмгольца, наблюдаемыми при визуализации течений, являются кольцевые двумерные вихри, а структурами азимутальной неустойчивости — трехмерные спиралевидные вихри различной конфигурации. Если иметь в виду, что в данной ситуации поперечное сечение струи представляет собой сплошной слой сдвига (профиль скорости течения Хагена–Пуазейля), можно предположить, что наблюдаемые на рис. 8 структуры являются спиралевидными вихрями азимутальной моды неустойчивости. Однако это качественное наблюдение требует более детального изучения для его подтверждения. Следует заметить, что акустическое воздействие оказывало заметное влияние на данную область неустойчивости струи, т. е. наблюдалось изменение структуры вихрей и характеристики их развития.

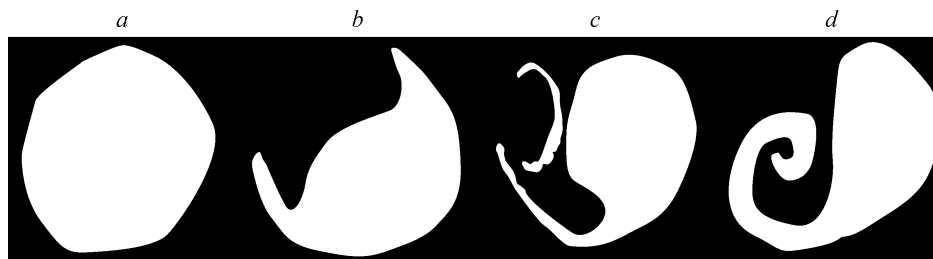


Рис. 8. Визуализация поперечного сечения ламинарной круглой струи, сформированной в канале с удлинением  $L/d = 200$ , на различных расстояниях вниз по потоку (a–d при  $x = 10, 40, 100, 150$  мм соответственно),  $U_0 = 5$  м/с ( $Re = U_0 \times d/\nu = 6667$ ).

## 2.2. Турбулентная струя

Струйное течение было турбулизовано с помощью турбулизатора 15 (см. рис. 1), причем скорость потока ( $U_0 = 5$  м/с,  $Re = U_0 \times d/\nu = 6667$ ) сохранялась такой же, что и при исследовании ламинарной струи. Следует отметить тот факт, что турбулизация классической круглой струи, вне зависимости от установки турбулизатора, происходила по хорошо известному сценарию: генерации кольцевых вихрей Кельвина–Гельмгольца и полосчатых структур на выходе из сопла, взаимодействию данных структур, сопровождаемому появлением азимутальных вихревых образований, динамика развития которых и приводила к турбулизации струи. Возникновению турбулентного течения в струе непосредственно на срезе сопла препятствовала неразвитость турбулентного пограничного слоя, генерированного шероховатостью в коротком сопле. Профиль скорости на срезе сопла оставался типичным для случая генерации ламинарной струи, т. е. с характерной полочкой в области ядра струи. Лишь при достаточно большом удлинении соплового аппарата, когда турбулентный пограничный слой на стенке канала в результате нарастания его толщины перекрывал все поперечное сечение канала, профиль скорости на выходе из сопла становился полностью турбулентным. Это хорошо видно на графиках (рис. 9). На рис. 9, *a* представлены распределения скорости в поперечном сечении круглой турбулентной струи на срезе сопла при различном его удлинении ( $L/d = 43,5, 65$  и  $200$  при  $L = 870, 1300$  и  $4000$  мм соответственно). Видно, что профили скорости при  $L/d = 65, 200$  ( $L = 1300, 4000$  мм) полностью турбулентные, а

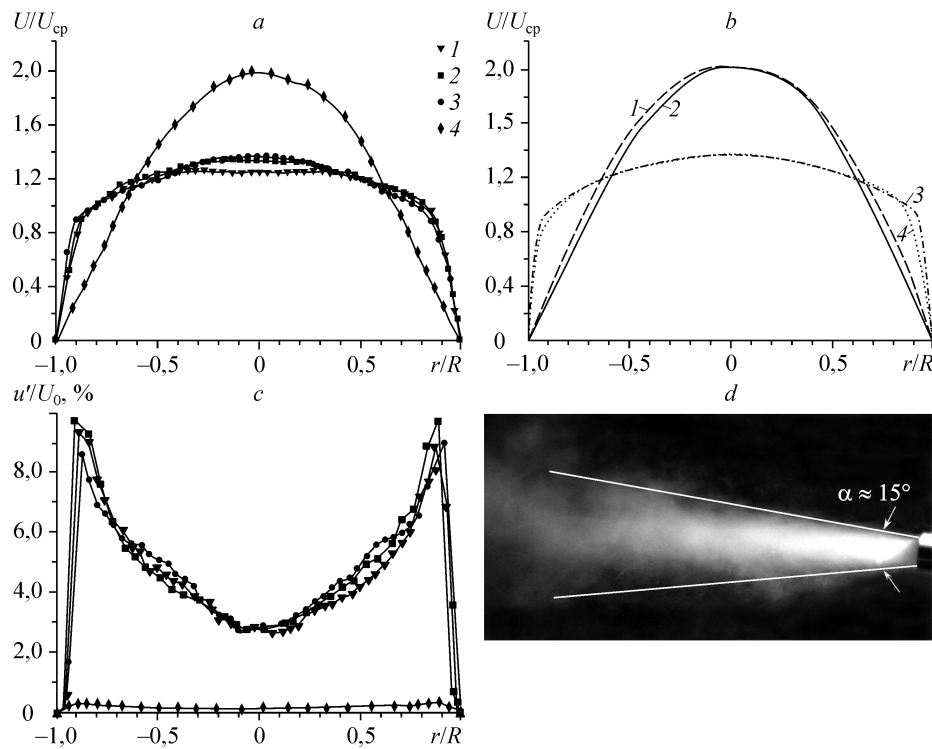


Рис. 9. Распределения скорости в поперечном сечении круглой турбулентной (1, 2, 3,  $L/d = 43,5, 65, 200$  соответственно) и ламинарной (4,  $L/d = 200$ ) струй при  $x = 2$  мм (a); сравнение данных распределений скорости в струе (2, 4) и круглом течении Хагена–Пуазейля (1, 3, взято из работы [20]) (b), распределения пульсаций скорости в поперечном сечении круглой турбулентной (1, 2, 3,  $L/d = 43,5, 65, 200$  соответственно) и ламинарной (4,  $L/d = 200$ ) струй при  $x = 2$  мм (c), а также визуализация дымовой турбулентной струи вдоль потока (d), скорость потока на оси струи  $U_0 = 5$  м/с ( $Re = U_0 \times d/\nu = 6667$ ).

при  $L/d = 43,5$  ( $L = 870$  мм) можно наблюдать характерную полочку в области ядра потока, указывающую на то, что турбулентное течение в канале еще до конца не сформировалось. Для сравнения на графике показан ламинарный профиль скорости на срезе сопла при удлинении канала  $L/d = 200$  ( $L = 4000$  мм). Результаты сравнения ламинарного и турбулентного профилей скорости, измеренных в круглой струе на срезе сопла при удлинении канала  $L/d = 200$  ( $L = 4000$  мм) в данном эксперименте с аналогичными измерениями в круглом канале Хагена–Пуазейля из работы [20] показаны на рис. 9, *b*. Видно хорошее качественное совпадение результатов измерений. На рис. 9, *c* показаны распределения пульсаций скорости в поперечном сечении круглой турбулентной струи на срезе сопла для тех же значений удлинения канала, что и в предыдущем случае ( $L/d = 43,5, 65$  и  $200$  при  $L = 870, 1300$  и  $4000$  мм соответственно). Видно, что уровень пульсаций для всех трех значений удлинения канала примерно одинаков. В области слоя сдвига он достигает максимального значения порядка 9–10 %  $U_0$ , а в области ядра струи снижается до 3 %  $U_0$ .

Для сравнения показано распределение пульсаций скорости, измеренное на срезе сопла при удлинении канала  $L/d = 200$  ( $L = 4000$  мм). Видно, что характер распределения в обоих случаях сохраняется (с максимальными значениями пульсаций в областях сдвигового слоя и их падением в области ядра струи). Однако величина интенсивности пульсаций в турбулентной струе резко возрастает, по сравнению с ламинарной струей (примерно в пятнадцать раз в слое сдвига и в десять раз в ядре струи). Следует заметить, что, хотя распределение скорости в поперечном сечении струи при удлинении канала  $L/d = 43,5$  ( $L = 870$  мм) еще демонстрирует предтурбулентный характер течения (см. рис. 9, *a*), на распределении пульсаций скорости это практически никак не сказывается (см. рис. 9, *c*). Тем не менее, полностью установившимся следует считать турбулентное течение в струе, когда оно сформировано при истечении из канала с удлинением  $L/d = 65$  ( $L = 1300$  мм) и более, в частности, при  $L/d = 200$  ( $L = 4000$  мм) для данных условий эксперимента. Общая картина дымовой визуализации турбулентной струи представлена на рис. 9, *d* откуда видно, что струя расширяется вниз по потоку под углом примерно 15 градусов. В то же время ламинарная струя, сформированная при истечении из данного канала, практически не расплывается вниз по потоку и даже можно наблюдать участок ее сужения в предпереходной области (см. рис. 6, *c*).

Таким образом, турбулентная круглая струя непосредственно на срезе сопла может быть реализована при начальных условиях потока с турбулентным профилем скорости, чего не удастся получить в случае классического — короткого сопла. Данное утверждение связано с невозможностью создать условия течения на выходе из короткого сопла с турбулентным профилем скорости по причине неразвитости турбулентного пограничного слоя из-за пространственной ограниченности его развития. Эксперименты показали, что при удлинении канала сопла  $L/d = 65$  ( $L = 1300$  мм) и выше реализуется турбулентный профиль скорости на срезе сопла.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты экспериментальных исследований по влиянию начальных условий на структуру и характеристики развития ламинарной и турбулентной струи показали, что это влияние кардинальное как на саму структуру струйного течения, так и на характеристики его устойчивости и восприимчивости. Начальные условия (распределения средней и пульсационной составляющих скорости) формирования струи на срезе сопла изменялись с помощью удлинения выходного канала короткого (классического) сопла. При этом с увеличением длины выходного канала

профиль скорости на его выходе постепенно приближался к параболическому, пока не становился полностью параболическим (для случая ламинарной струи), характерным для течения в круглом канале с каноническим профилем скорости Хагена–Пуазейля при длине канала 4000 мм в данном эксперименте. Исследования ламинарной струи показали, что в случае короткого (классического) сопла область чисто ламинарного течения практически отсутствует, а сразу на срезе сопла и далее вниз по потоку наблюдается переходный режим, связанный с неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца, полосчатыми структурами, взаимодействием последних с кольцевыми вихрями и, наконец, турбулизацией струи (см. рис. 3). При удлинении канала появляется область чисто ламинарного течения в струе, а область перехода сдвигается далее вниз по потоку (см. рис. 4, *c–6, c*). Профили скорости на срезе сопла, в этом случае, меняют свою форму от П-образной до параболической, как это видно на графиках рис. 10. Если сравнивать распределения пульсаций скорости на срезе классического и удлиненного сопел, то можно отметить следующие особенности. Во всех ситуациях максимальные величины пульсаций скорости наблюдаются в слое сдвига, а минимальные — в ядре струи. Следует отметить общее снижение интенсивности пульсаций скорости (от 4,5 %  $U_0$  до 1 %  $U_0$  в слое сдвига и от 1 %  $U_0$  до 0,1 %  $U_0$  в ядре струи) при удлинении канала.

Однако можно наблюдать и нарастание интенсивности пульсаций скорости вниз по потоку от среза сопла в слое сдвига в каждой отдельной постановке (см. рис. 3, *b–5, b*). Эти данные отражают наблюдаемые картины дымовой визуализации ламинарной струи, т. е. увеличение пространственной протяженности чисто ламинарного течения в струе с ростом удлинения канала. Другой важной особенностью развития ламинарной круглой струи является ее восприимчивость к акустическому воздействию. Обнаружено уменьшение масштаба кольцевых вихрей, возникающих в области перехода при удлинении канала  $L/d = 21,5$  ( $L = 430$  мм), примерно, в два раза при изменении акустического воздействия с частоты  $F = 250$  на 110 Гц (см. рис. 7). Однако с ростом величины удлинения канала  $L/d = 200$  ( $L = 4000$  мм) и, соответственно, увеличением протяженности чисто ламинарного течения в струе акустика не оказывала влияния на генерацию каких-либо вихревых структур в ней, независимо от частоты и интенсивности акустического воздействия. Вместе с тем, в данной ситуации наблюдалось появление спиралевидных структур в области перехода, (см. рис. 8), что, возможно, связано с азимутальной модой неустойчивости струйного течения. Влияния акустического поля на данные вихревые структуры не обнаружено.

Исследования турбулентной круглой струи проведено при той же скорости потока ( $U_0 = 5$  м/с ( $Re = U_0 \times d/\nu = 6667$ )), что и ламинарной круглой струи, для чего пришлось использовать турбулизатор (см. рис. 1), наклеенный на внутреннюю поверхность выхода классического сопла. Полностью турбулентную струю (см. рис. 9, *d*), начиная от среза сопла, удалось реализовать лишь при достаточно большом его удлинении  $L/d = 65$  ( $L = 1300$  мм), когда профиль

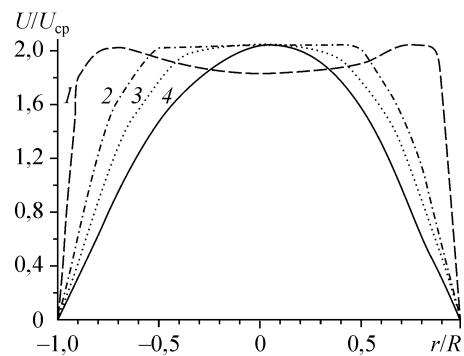


Рис. 10. Осредненные профили скорости в поперечном сечении круглой ламинарной классической струи (1) и при различном удлинении соплового канала (2, 3, 4,  $L/d = 43, 65, 200$  соответственно).

скорости на выходе струи из сопла становился полностью турбулентным (см. рис. 9, *a*). Как уже отмечалось выше, турбулентную струю, начинающуюся непосредственно на срезе сопла, в случае короткого классического сопла реализовать не удалось. Причина понятна: для этого необходима достаточно большая пространственная протяженность канала, чтобы толщина турбулентного пограничного слоя на стенке сопла нарастала вниз по потоку, и он перекрыл полностью его поперечное сечение, в нашем случае это произошло при удлинении  $L/d = 65$ . С ростом удлинения канала ( $L/d = 200$ ), турбулентный характер течения в струе, начиная со среза сопла, сохранялся. Профили пульсаций скорости на срезе сопла в турбулентной струе (см. рис. 9, *c*) указывают на то, что турбулентное течение в струе равновесное и установившееся. Видно, что независимо от величины удлинения канала, из которого струя истекает, профили пульсаций скорости практически совпадают, даже в случае, когда профиль скорости при удлинении  $L/d = 43,5$  ( $L = 870$  мм) еще не совсем приобрел турбулентный характер (см. рис. 9, *a*). Профили пульсаций скорости в турбулентной струе демонстрируют резкий рост интенсивности пульсаций более чем в 15 раз в области сдвигового слоя и в 10 раз в ядре струи по сравнению с профилем пульсаций скорости для ламинарной струи (см. рис. 9, *c*). Можно также отметить плавное снижение максимального значения интенсивности пульсаций скорости в области сдвигового слоя к ее минимальному значению на оси канала в профилях пульсаций скорости турбулентной струи. С другой стороны, аналогичные профили ламинарной струи имеют менее плавную форму: большие величины пульсаций скорости в узком слое сдвига резко снижаются в ядре струи, выходя примерно на один уровень интенсивности.

В целом, результаты экспериментальных исследований по влиянию начальных условий на формирование круглой дозвуковой ламинарной и турбулентной струй показали широкие возможности для дальнейших исследований в этом направлении. Предполагается, что все особенности и различия классического и канонического течения в круглой струе будут также наблюдаться и в пристенной и в импактной круглых струях. В частности, будут детально исследоваться обнаруженный вид неустойчивости чисто ламинарной струи, особенности развития пристенной и импактной струй, генерированных при начальных условиях истечения из круглого канала с ламинарным и турбулентным каноническим профилем Хагена–Пуазейля.

### ВЫВОДЫ

По результатам настоящих экспериментальных исследований влияния начальных условий на срезе сопла на структуру круглой струи можно сделать следующие основные выводы:

1. Изменение начальных условий формирования круглой струи, а именно, профилей средней и пульсационной составляющих скорости на срезе сопла оказывает кардинальное влияние на ее структуру и характеристики развития;
2. Удлинение канала классического короткого сопла приводит к изменению начальных условий формирования круглой ламинарной струи и появлению области чисто ламинарного течения в струе, протяженность которой растет с ростом удлинения канала, достигая величины  $l/d = 10$  при  $L = 4000$  мм;
3. Профили пульсаций скорости на срезе сопла, в случае ламинарной струи, имеют максимум интенсивности ( $4,5\% U_0$ ) в области слоя сдвига и минимум в ядре струи ( $1\% U_0$ ), причем с ростом удлинения канала интенсивность пульсаций падает до  $1\% U_0$  в слое сдвига и до  $0,1\% U_0$  в ядре струи;
4. Масштаб кольцевых вихрей может изменяться при акустическом воздействии на ламинарную круглую струю в зависимости от его частоты;

5. Акустика, вне зависимости от ее частоты и интенсивности, не оказывает влияния на генерацию вихревых структур в чисто ламинарной круглой струе, генерированной при удлинении канала  $L/d = 200$ ;

6. Турбулентную круглую струю можно реализовать непосредственно на срезе сопла только при достаточно большом удлинении соплового канала ( $L/d = 65$ ), когда турбулентный пограничный слой на стенке канала нарастет до полного перекрытия его поперечного сечения;

7. Интенсивность пульсаций скорости на срезе сопла в турбулентной струе при удлинении канала  $L/d = 43,5$  и выше практически совпадает, и это указывает на то, что турбулентное течение в струе равновесное и установившееся;

8. Уровень пульсаций скорости в турбулентной круглой струе более чем в 15 раз выше по сравнению с ее уровнем для ламинарной струи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Abid M.** Simulation numeriques directes de la dynamique de transition tridimensionnelle des jets axisymetriques // Ph.D. thesis. — Ecole Normale Superieure de Paris, 1993. — 97 с.
2. **Brancher P., Chomaz J.M., Huerre P.** Direct numerical simulation of round jets: Vortex induction and side jets // Phys. Fluids. — 1994. — No. 6. — P. 1768.
3. **Metcalfe R.W., Orszay S.A., Brachet M.E., Menon S., Riley J.J.** Secondary instability of a temporally growing mixing layer // J. Fluid Mech. — 1987. — No. 184. — P. 207.
4. **Crow S.C., Champagne F.H.** Orderly structure in jet turbulence // J. Fluid Mech. — 1971. — Vol. 48. — P. 547–591.
5. **Bernal L.P., Roshko A.** Streamwise vortex structure in plane mixing layers // J. Fluid Mech. — 1986. — No. 170. — P. 499.
6. **Lasheras J.C., Cho J.S., Maxworthy T.** On the origin and evolution of streamwise vortical structures in plane free shear layer // J. Fluid Mech. — 1986. — No. 172. — P. 231.
7. **Liepmann D., Gharib M.** The role of streamwise vorticity in the near-field entrainment of round jets // J. Fluid Mech. — 1992. — Vol. 245. — P. 643–668.
8. **Monkewitz P.A., Lehmann B., Barsikow B., Bechert D.W.** The spreading of self-excited hot jets by side jets // Phys. Fluids. — 1989. — A 1. — P. 446.
9. **Monkewitz P.A., Pfizenmaier E.** Mixing by side jets in strongly forced and self-excited round jets // Phys. Fluids. — 1991. — A 3. — P. 1356.
10. **Горлин С.М., Слезингер И.И.** Аэромеханические измерения (методы и приборы). — М.: Наука, 1964. — 720 с.
11. **Копьев В.Ф., Чернышев С.А.** Колебания вихревого кольца, возникновение в нем турбулентности и генерация звука // Успехи физических наук. — 2000. — Т. 170, № 7. — С. 713–742.
12. **Yule A.J.** Large-scale structure in the mixing layer of a round jet // J. Fluid Mech. — Vol. 89. — P. 413–432.
13. **Lau J. 1978, C., Fisher M.J.** The vortex-street structure of “turbulent” jets // J. Fluid Mech. — 1975. — Vol. 67. — P. 299–337.
14. **Козлов В.В., Грек Г.Р., Лефдаль Л.Л., Чернорай В.Г., Литвиненко М.В.** Роль продольных локализованных структур в процессе перехода к турбулентности в пограничных слоях и струях (обзор) // ПМТФ. — 2002. — Т. 43, № 2. — С. 62–76.
15. **Литвиненко М.В., Козлов В.В., Козлов Г.В., Грек Г.Р.** Влияние продольных полосчатых структур на процесс турбулизации круглой струи // ПМТФ. — 2004. — Т. 45, № 3. — С. 50–60.
16. **Hussain A.K., M.F.** Coherent structures and turbulence // J. Fluid Mech. — 1986. — Vol. 173. — P. 303–356.
17. **Grinstein F.F., Gutmark E.J., Parr T.P., Hansson-Parr D.M., Obeysekare U.** Streamwise and spanwise vortex interaction in a circular reacting jet-an experimental and computational study // Turb. Shear Flows X. — Penn. State, USA, 1995. — P. 34–39.
18. **Citrinity J.H., George W.K.** Reconstruction of the global velocity field in the axisymmetric mixing layer utilizing the proper orthogonal decomposition // J. Fluid Mech. — 2000. — Vol. 418. — P. 137–166.
19. **Cohen J., Wignanski I.** The evolution of instabilities in axisymmetric jet. Part 1. The linear growth of disturbances near the nozzle // J. Fluid Mech. — 1987. — Vol. 176. — P. 191–219.
20. **Durst F., Bulent U.** Forced laminar-turbulent transition of pipe flows // J. Fluid Mech. — 2006. — Vol. 560. — P. 449–464.

*Статья поступила в редакцию 20 июня 2007 г.*